

**Manufacturing method for monolithic multi-layer piezoceramic actuator with microfaults provided in actuator joints parallel to inner electrodes**

Publication number: DE10234787  
Publication date: 2003-10-30  
Inventor(s): HEINZMANN ASTRID (DE); HENNIG EBERHARD (DE);  
KOPFSCHE DANIEL (DE); PERTSCH PATRICK (DE);  
RICHTER STEFAN (DE); WEHRSDORFER EIKE (DE)  
Applicant: PI CERAMIC GMBH KERAMISCHE TEC (DE)  
Classification:  
- international: H01L41/047; H01L41/083; H01L41/24; H02N2/04;  
H01L41/00; H01L41/083; H01L41/24; H02N2/02; (IPC1-  
7); H01L41/22; H01L41/083; H02N2/04  
- European: H01L41/047; H01L41/083; H01L41/24  
Application number: DE20021034787 20020730  
Priority number(s): DE20021034787 20020730; DE20021025405 20020607

[Report a data error here](#)

**Abstract of DE10234787**

The manufacturing method has a stacked device provided by a quasi mechanical series circuit formed from a number of piezoplates (2) by sintering green foils, with inner electrodes (3,4) incorporated in the plate stack fed to its opposing side surfaces for connection in parallel electrode groups via metallisation layers (5). Microfaults (6) are provided in the actuator joints along the stack longitudinal axis parallel to the inner electrodes and adjacent the opposing side surfaces, e.g. by preventing sintering of the green foils, for provision of internal stress points. An independent claim for a monolithic multi-layer actuator is also included.

.....  
Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

④ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

④ **Patentschrift**  
**DE 102 34 787 C 1**

④ Int. Cl. 7:  
**H 01 L 41/22**  
H 02 N 2/04  
H 01 L 41/083

DE 102 34 787 C 1

④ Aktenzeichen: 102 34 787-5-35  
④ Anmeldestag: 30. 7. 2002  
④ Offenlegungstag: -  
④ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 30. 10. 2003

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

④ Innere Priorität:  
102 25 405. 2 07. 06. 2002

④ Patentinhaber:  
Pi Ceramic GmbH Keramische Technologien und  
Bauelemente, 07699 Ledershose, DE

④ Vertreter:  
Meissner, Bolte & Partner, 80538 München

④ Erfinder:  
Heinzmann, Astrid, 07549 Gera, DE; Hennig,  
Eberhard, 07646 Stadtroda, DE; Kopsch, Daniel,  
04886 Großstebben-Zwethau, DE; Persch, Patrick,  
07629 Hermsdorf, DE; Richter, Stefan, 07927  
Hirschberg, DE; Wehrsdorfer, Eike, 07607  
Eisenberg, DE

④ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
DE 40 29 972 A1  
DE 39 40 619 A1  
EP 10 65 735 A2  
EP 08 44 678 A1  
WO 00/79 607 A1

④ Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors, monolithischer Vielschichtaktor aus einem  
plazokeramischen oder elektrotraktiven Material

④ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors, einen entsprechenden Vielschichtaktor sowie eine Außenkontakteierung für einen monolithischen Vielschichtaktor. Erfindungsgemäß sind erstmals der Stapelflängsachsensatz des Aktors im waagrechten parallel zu den Innenelektroden, von diesen beeinspiriert, im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Außenflächen, zu denen die an sich bekannten Innenelektroden herausgeführt sind, gezielt Mikrostörungen im Aktorgefüge eingebracht, welche frühestens beim Polarisieren des Aktors einen vorgegebenen, begrenzten, spannungsabbauenden Wachstum in das Innere und/oder zur Außenelektrode unterliegt, wobei weiterhin die Grundmetallisierung und/oder Außenkontakteierung mindestens im Bereich der Mikrostörungen im Aktorgefüge dehnungsresistent oder elastisch ausgebildet ist.

DE 102 34 787 C 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktes aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor als Stapelanordnung in quasi mechanischer Reihenschaltung einer Vielzahl von Piezoplatten durch Grünfolien ausgebildet wird, vorliegende Innenlektroden im Plattenstapel zu gegenüberliegenden Außenflächen des Staples geführt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Außenkontakteierung jeweilige Elektrodengruppen parallel verschaltet sind gemäß Oberbegriff des Patentanspruches 1. Weiterhin betrifft die Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor eine Stapelanordnung von Piezoplatten ist, welche über inneren Elektroden, eine gemeinsame Grundmetallisierung sowie Außenkontakteierung verfügt gemäß Oberbegriff des Patentanspruches 13.

[0002] Piezokeramische Aktores sind elektro-mechanische Wandler, bei denen der reciproke piezoelektrische Effekt ausgenutzt wird. Legt man an eine piezokeramische Platte mit Blektroden auf ihren Flächenplänen, die in Richtung der Plattentiefe polarisiert ist, eine elektrisches Feld an, so kommt es zu einer Formänderung. Konkret vollzieht sich eine Ausdehnung in Richtung der Plattendicke, wenn das angelegte elektrische Feld parallel zum ursprünglichen Polingsfeld gerichtet ist. Gleichzeitig kommt es senkrecht zur Feldrichtung zu einer Kontraktion.

[0003] Durch Überlappenderspektren einer Vielzahl solcher Platten im Sinne einer mechanischen Reihenschaltung und elektrischer Parallelschaltung der Platten, können so die Deformationen der einzelnen Platten addiert werden. Bei einem Dehnungsmögeln von etwa 0,1...0,2% bei Fehlstärken von 2 kV/mm lassen sich so Auslenkungen von etwa 1...2 µm pro mm Bauteile realisieren.

[0004] Bei monolithischen Vielschichtaktores erfolgt das Stapeln bereits im grünen Zustand und die endgültige Vorbildung wird durch Sintern vorgenommen. Hierbei werden bis zu einigen hundert piezokeramische Grünfolien alternierend mit metallischen Innenlektroden gestapelt, verpreßt und zu einem monolithischen Körper gesintert. Die Innenlektroden werden dabei wechselseitig auf die gegenüberliegenden Flächen bis zur jeweiligen Oberfläche herausgezogen und dort im Rogelfall durch eine Grundmetallisierung in Dicke- oder Dämmschichtausführung miteinander verbunden. Dieses Design wird auch mit Intergigitalelektroden bezeichnet. Ein piezoelektrischer Aktor umfasst also piezokeramische Schichten und Gruppen von innen lektroden, die jeweils auf gegenüberliegende Flächen bis an die Oberfläche führen. Eine Grundmetallisierung dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Weitershin sind inaktive Bereiche vorhanden, die weder hohe Polarisation noch beim üblichen Betrieb des Aktes piezoelektrisch gedeckt werden.

[0005] Diese inaktiven Bereiche in den Multilayakturen mit interdigitaten Elektroden stellen ein kritisches Moment für die Berstellbarkeit und Zuverlässigkeit derartige Produkte bzw. unter Rücksicht auf soziale Produkt realisierter Finalerzeugnisse dar. Aufgrund der hohen Zug-Spannungskonzentrationen in den inaktiven Bereichen und in Verbindung mit der geringen Zugfestigkeit der piezokeramischen Werkstoffe kommt es bereits bei der Polarisierung, die mit remanenter Dehnungen von bis zu 0,3% verbunden ist oder aber später beim Betrieb zu unverhältnismäßigen Rissbildung.

[0006] Die vorgenannte unkontrollierte Rissbildung hat verschiedene Ausfallmechanismen der Aktores zur Folge. Setzt sich das Risswachstum in das Innere des Aktes fort,

kann dies einerseits zur mechanischen Zerstörung des Aktes führen, andererseits können hierdurch bedingt innere Überschläge auftreten, wenn der Riss von einer Elektroden schicht zur anderen wächst. Mit einer geeigneten Prozessführung kann das Risswachstum in das Innere des Aktes begrenzt werden. Nicht verhindern werden kann allerdings das Risswachstum in Richtung der Aktoroberfläche. Entfernt die Riss die Aktoroberfläche, führt dies zur Unterbrechung der auf der Oberfläche aufgebrachten Grundmetallisierung. Hierdurch werden Teilbereiche des Aktes galvanisch von der Spannungszuführung abgeschnitten und infolge dessen treten elektrische Überschläge an den Umrürechnungen der Grundmetallisierung auf. Diese Überschläge wiederum sind der Grund, die letztendlich zum Totalausfall des Aktes führen.

[0007] Zur Überwindung der zitierten Rissproblematik sind eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die entweder die Verhinderung der Rissbildung oder bei nicht zu verhindern den unkontrollierten Rissbildungen ein Reduzieren oder Eliminieren von Überschlägen an der Grundmetallisierung auf die Oberfläche durch zusätzliche Maßnahmen zum Ziel haben.

[0008] Die JP 58-196077 offenbart einen Multilayersatz und ein Verfahren zu seiner Herstellung, bei dem entlang der Aktorachse eine Vielzahl von Schlitzten mit einer Tiefe von etwa 0,5 mm parallel zu den inneren Elektroden in den Aktor eingebracht wird. Diese Schlitzte führen ähnlich wie die aus anderen Bereichen der Technik bekannten Dehnungsfugen zum Abbau von Spannungskonzentrationen und verhindern somit eine unkontrollierte Rissbildung oder ein Wachstum des Risses im Aktorgefüge. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass durch diese Schlitzte auch der tragende Querschnitt des Aktes verringert ist, was gleichzeitig die Druckbelastbarkeit des Aktes im Einsatz verringert. Beim angegebenen Beispiel reduziert sich der tragende Querschnitt des Aktes auf 3 x 3 mm<sup>2</sup> bei einem Gesamtquerschnitt von 4 x 4 mm<sup>2</sup>. Das zitierte Vorfahren, bei dem die Schlitzte durch thermisch verarbeitbare Schichten auf den grünen Keramikfolien beim Sintern gebildet werden, weist auch auf weitere Probleme hin, die beim Sintern zu einem ebenfalls unkontrollierten Risswachstum führen können und die nur durch spezielle aufwendige Ausgestaltungen der inneren Blektroden verhindert sind. Als Ursache für die Rissbildung beim Sintern wird die inhomogene Verdichtung des grünen Staples beim Vorpresen erwähnt.

[0009] Bei der EP 0 844 678 A1 wird ebenfalls auf die Problematik der Rissbildung und deren Folgen eingegangen, wenn durch die Risse die Grundmetallisierung zerstört wird.

[0010] Zur Verminderung von Schädigungen des Aktes wird dort vorgeschlagen, zwischen der Spannungszuleitung und der Grundmetallisierung eine dreidimensionale strukturierte elektrisch leitfähige Elektrode einzufügen, die nur parallel mit der Grundmetallisierung verbunden ist und die zwischen den Kontaktstellen dehnsbar ausgebildet wird. Die praktische Realisierung einer solchen dreidimensionalen Struktur erfordert über einen sehr hohen Aufwand, da die parabolischen Kontaktstellen einen metrischen Abstand in der Größenordnung des Abstandes der unteren Elektroden haben müssen.

[0011] Bei der Anordnung für eine sichere Kontaktierung von piezoelektrischen Aktores nach DB 196 46 676 C1 wird an der als Kontaktstufen ausgeführten Grundmetallisierung eine elektrisch leitende Kontaktfahne mit hoher Rissfestigkeit so angebracht, dass ein überstehender Bereich der Kontaktfahne verbleibt. Dabei muss der überstehende Bereich der Kontaktfahne so groß ausgebildet werden, dass auftretende Risse die Kontaktfahne nicht vollständig durch-

tretenen, eine solche Anordnung ist aber sehr empfindlich beim Handling. Bekanntlich besitzt die Grundmetallisierung auf der Oberfläche des piezokeramischen Aktors nur eine sehr geringe Schärfestigkeit. Bereits geringe Schärfkräfte führen zur Ablösung der Grundmetallisierung von der Aktoroberfläche und somit zum teilweisen oder vollständigen Verlust der elektrischen Kontaktierung zu den Ionenleitungsketten.

[0012] Eine weitere Variante, dass Risswachstum vom Aktorkörper zur Oberflächenlektrode zu entkoppeln ist in der DE 10 17 331 C1 offenbart. Dort wird vorgeschlagen, zwischen Grundmetallisierung und Außenkontakte eine elektrisch leitende Pulverschicht einzubringen. Eine solche Anordnung verhindert zwar den Rissfortschritt, ist aber technisch nur unter erheblichen Aufwendungen zuverlässig zu realisieren, da der elektrische Kontakt der Pulverschichten mit der inneren und äußeren Elektrode und im wechselseitigen Kontakt mit einer Kontaktinduktionsdruck erfolgt, was einen Kontaktinduktionsdruck erfordert. Weiterhin sind berührende Kontaktstellen sehr stark gegenüber Korrosionserscheinungen anfällig.

[0013] Die WO 00-79607 A1 und WO 00-63980 A1 offenbaren Lösungen die darauf abzielen, jede der an die Oberfläche heraushängenden Elektroden einzeln zu kontaktieren. Bei Elektrodenabständen von 50-250 µm ist dies jedoch nicht kostengünstig umsetzbar.

[0014] Aus dem Vorgenannten ist es daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material anzugeben, mit dessen Hilfe es gelingt einen Aktor mit hoher Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität zu schaffen, welcher darüber hinaus in der Lage ist, hohe Druckkräfte bei geringem Aktorgewicht Stand zu halten. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material zu schaffen, wobei dieser notarige Aktor über verbesserte Gebrauchseigenschaften verfügen soll.

[0015] Die vorfahrensseitige Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt mit einer Lehre in der Definition nach Patentanspruch 1.

[0016] Bezüglich des Vielschichtaktors sei sei sei auf die Merkmalskombination nach Anspruch 13 verwiesen.

[0017] Die Unteransprüche stellen jeweils zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen des Erfindungsgegenstandes dar.

[0018] Der Grundgedanke der Erfindung liegt unter Berücksichtigung der in den Ansprüchen konkretisierten Lehre darin, entlang der Aktorschicht und ins wesentliche parallel dazu die finnenelektroden im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Außenflächen, zu denen die inneren Elektroden wechselseitig herangeführt werden, Mikrostörungen im Aktortypiglett so einzubauen, dass diese als quasi am vorbekannten Ort stehende Rissquelle wirken, wobei das Risswachstum kontrollierbar ist. Die Außenkontaktierung wird durch eine in Ansicht bekannter Weise mittels Dicke- oder Dünnaufschichttechnologie resistivische Grundmetallisierung gebildet, wobei die Elektrodenbereiche zwischen den Oren der Mikrostörungen und möglicher, nach außen reichende Risse durch eine dehnungsresistente, zweite Außenelektrode miteinander verbunden werden.

[0019] Durch den gezielten Einbau von Gefügeschwächen, die als potentielle Rissquelle wirken, kann eine weitere Rissbildung gezielt gesteuert werden. Bei einem Abstand der Rissquellen im Bereich von ein 4, bevorzugt 2-3 mm werden die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut, dass in den Abschnitten zwischen den Rissquellen auch bei zyklischer Belastung von weit über  $10^6$  Zyklen keine weitere Rissbildung beobachtet wird.

[0020] Von erfundungswesentlicher Bedeutung ist, dass die gezielt eingeschalteten Mikrostörungen um Aktorgerüste selbst noch keinen Riss im eigentlichen Sinne darstellen. Der gezielt gesteuerte Riss entsteht erst nach der Polarisierung des Aktors und zwar nur in dem Umfang, wie beim Polarisierten ehemalige Dehnungen gegeben sind. Dadurch, dass das Gefüge beim Schutz des Aufbringens der Grundmetallisierung noch geschlossen ist, dringt auch keine Metallisierungsmasse in das piezokeramische Material ein, was zu einer wesentlichen Qualitätsverbesserung derartig reziproker Aktoren führt.

[0021] Die Mikrostörungen verhindern ördlich begrenzt das Zusammensintern der Grünfolien mit dem Ergebnis einer dezidierten Delamination.

[0022] Zum Bereich dieses Delaminierens besteht die Möglichkeit im Bereich gewöhnlichen Mikrostörungen hohe Stapelaufzahl einer Schicht oder Mengen eines organischen Binders aufzubringen, welche einen Volumenanteil von bis zu 50% organischer Partikel mit einem Durchmesser  $\leq$  200 nm enthält, die beim Sinternprozess inhezus vollständig ausbrennen.

[0023] Diese vorgeschriebene Schicht kann durch Siebdruck aufgebracht werden und wird vor dem Sintern durch Pressen daran verdichtet, dass die in den Grünfolien eingebetteten Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammensintern ganz oder teilweise zu unterbinden.

[0024] Alternativ besteht die Möglichkeit die Mikrostörungen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von  $\leq$  1 µm auszubilden, wobei diese Füllpartikel nicht mit den piezoelektrischen Werkstoff des Staples reagieren. Die Füllpartikel werden in an sich bekannte Weise dem Binder zugewusst und stellen ein Bestandteil des Letzteren dar.

[0025] Bei einer weiteren Ausführungsform besteht die Möglichkeit die Mikrostörungen durch Keramikpulpa zu produzieren, wobei diese Keramikpulpa entweder im prämen oder gesinterten Zustand erzeugt werden, ohne jedoch die tragende Querschnittsfläche des Aktortyps zu nachzuladen.

[0026] Dadurch, dass die Lage potentieller Risse durch das definierte Einbringen der Mikrostörungen bekannt ist, besteht die Möglichkeit in Kenntnis dieser Position oder Lage die Außenkontaktierung auszustalten. Die Außenkontaktierung besteht jeweils aus einer fließigen Biegeelektrode, welche mit der Grundmetallisierung handfest im Bereich zwischen den Mikrostörungen elektrisch in Verbindung steht.

[0027] Konkret kann die fließige Biegeelektrode einen aufgelösten Kupfer/Berylliumstreifen umfassen, wobei der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufweisende Abschnitte umfasst. Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse verläuft im Bereich der jeweiligen Mikrostörung.

[0028] Bei einer Alternative ist die Biegeelektrode als Münz oder Doppelminzenelektrode ausgeführt, wobei die Verbindungsabschnitte des Minzards jeweils im Bereich der Mikrostörungen verlaufen.

[0029] Auf den Biegeelektroden befinden sich Lwabschnitte oder Lßspuren zur Kontaktierung mit der Grundmetallisierung und/oder zur weiteren Verdichtung.

[0030] Die Stapelanordnung, welche den Aktor bildet, umfasst elektrodentreue passive Endschichten als Kraftkoppelemente.

[0031] Der Abstand der ersten Mikrostörung zur passiven Endschicht ist gleich dem ganzen oder halben Abstand der übrigen, über die Längachse verteilten Mikrostörungen gewählt.

[0032] Der erfundungsgemäße Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostrikiven Material weist cat-

lung der Stapellängssachse ist wesentlichen parallel zu den Innenelektroden delaminierende Mikrogefügestörungen auf, wobei dort die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitigem Erhalt der Druckfestigkeit des Stahls verringert ist.

[0033] Weiterhin besitzt der mesolithische Vielschichtaktor jeweils dehnungsfeststeife, flächige Außenelektroden, welche nur punktuell mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den defaminierten Mikrogefügestörungen verbunden ist.

[0034] Die Außenelektrode kann in einer Ausführungsform als Mündung oder Doppelmündung mit Biegegelenkfunction gestaltet sein. Auch besteht die Möglichkeit, diese Außenelektrode an Anodenunterteilung offener Ellipsen im Sinne eines Hilfssprungs mit Biegegelenkfunctionen auszubilden, wobei zwischen den Ellipsen im wesentlichen in Richtung der Nebenachsen verlaufend ein Verbindungs- und Kontaktierungssieg vorhanben ist.

[0035] Das Hauptziel der jeweiligen offenen Ellipsen der Außenelektrode verläuft im wesentlichen im Bereich der Mikrogefügestörungen. Dort möglicherweise entstehende, nach aussen drängende Risse ziehen keine elektrische Unterbrechung der Kontaktierung nach sich.

[0036] Am oberen und/oder unteren Ende des Aktors ausgebildete passive Kontaktstellen können als mesolithische Isolatorschicht ausgebildet werden, welche Koppelemente trägt oder aufnimmt.

[0037] Zusammenfassend liegt der Lösungsansatz der Erfindung darin, gezielt in dem Aktormaterial für Gefügeschwächungen Risse zu tragen, so dass an dann bekannten Stellen Risse entstehen und zwar erstmals dann, wenn der Aktor einer Polarisierung unterworfen wird. Dadurch, dass die Lage der gezielten erzeugten Risse bekannt ist, kann durch eine entsprechende detaillierte Elektrodenkonfiguration dafür gesorgt werden, dass eine elektrische Kontaktierung in jedem Fall sicher stattfindet bzw. erhalten bleibt.

[0038] Bekanntermaßen findet ein Risswachstum im weitem Sinne senkrecht zur Aktorlängssachse und zwar in beiden Richtungen, das heißt sowohl ins Innere des Aktors hinein als auch nach aussen zur Grundmetallisierung hin statt. Dies ist üblicherweise ein negativer Effekt. Da aber erfahrungsgemäß die Außenkontakteierung aufgrund der bekannten Lage der Risse modifizierbar ist, können potentielle Risse von vorherher überbrückt werden und es werden die im Stand der Technik gegen Aufzähllöscheinungen reduziert.

[0039] Gemäß dem Stand der Technik ist es notwendig eine möglichst hohe Anzahl von Kerben oder Schlitzte insbesondere auch im Endbereich des Aktors einzubringen, da die Spannungssverhältnisse im Aktor selbst nicht bekannt sind. Jetzt der entzündenden Kerben oder Schlitzte führt aber zu einer verringerten mechanischen Stabilität und damit Belastbarkeit des Aktors selbst.

[0040] Bei der vorliegenden Erfindung werden zwar gezielte Gefügeveränderungen eingebaut, die potentiell auch einen Riss nach sich ziehen können, wenn entsprechende Spannungen auftreten, dies ist aber nicht vergleichbar mit einer vom Hersteller unabwendbaren mechanischen Schwächung des Gefüges durch einen Schlitz, der beispielsweise durch Fräsen, Linskarben oder ähnlich erzeugt wird. Die aus dem Stand der Technik bekannten Schlitzte entsprechen einem Materialabtrag. Der materialabtragende Bereich des Aktors leistet aber augenscheinlich keinen Festigkeitsbeitrag mehr.

[0041] In dem Falle, wenn in die Bitalschicht größere, ein zusammenhängende Partikel eingebracht werden verbleibt der vorteilhafte Effekt, dass eine Tragfähigkeit- oder Kraftübernahme durch diese Partikel gewähr-

leistet ist, die einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Gesamtstabilität leisten. Hierbei ist wünschlich, das beim Aktor selbst nur Druckkräfte in Richtung der Aktorlängssachse interessieren.

[0042] Die Kerbansätze nach der Herstellung sind keinesfalls vergleichbar mit den makroskopischen Kerben nach dem Stand der Technik. Hier handelt es sich vielmehr um im Mikrometerbereich liegende Hindernisse, die quasi mit dem Händrücken eines Probehörpers, wie aus der Materialprüfung bekannt, vergleichbar sind.

[0043] Wie oben erläutert, ist dafür Sorge zu tragen, dass bei dem Überlappenderschichten der einzelnen Polien zwischen ausgewählten Bereichen von Folien oder Schichten ein Delaminationseffekt eintritt. Dieses bedeutet, dass dort eine Zugbeanspruchung nicht möglich ist, jedoch die benachbarten Folien so doch aufeinanderdrücken, dass eine Druckkraftübertragung möglich wird und zwar im Gegensatz zu den Bereichen mit Schlitz oder Kerbe nach dem Stand der Technik.

[0044] Bei einer Ausführungsform kann der Abstand zwischen zwei wechselseitig herausgeführteten Elektroden in einem oberen und/oder unteren Endbereich des Aktors doppelt so groß sein wie zu den darunterliegenden, benachbarten Elektroden. Aufgrund des größeren Abstands ist ein Hineinwirken eines durch das veränderte Mikrogefüge bedingten Risses in den Rückenbereich und damit ein Unterbrechen der Elektrode im Inneren des Aktos verhindert. Der Nachteil einer dort vorliegenden anderen Feldstärke wird auf jeden Fall von Vorteil des aktiven Leistungsbetrags des Aktors in diesem Bereich aufgeheben.

[0045] Der Brümschritt soll nachstehend abhängig von Ausführungsbeispieln sowie unter Zuhilfenahme von Figuren näher erläutert werden.

[0046] Hierbei zeigen:

[0047] Fig. 1 eine prinzipielle Stapelfaktorenordnung nach dem Stand der Technik;

[0048] Fig. 2a ein erfundengemäßiger Aktor vor der Polarisierung;

[0049] Fig. 2b ein Aktor nach der Polarisierung;

[0050] Fig. 3a eine Ausführungsform der Außenkontakteierung mit Mündungselektrode;

[0051] Fig. 3b eine Ausführungsform der Außenelektrode mit offener Ellipse;

[0052] Fig. 4a eine Schnittdarstellung eines erfundengemäßigen Aktors mit verändertem Abstand gegenüberliegenden Innenelektroden in vorgegebenen Endbereichen und

[0053] Fig. 4b eine Seitenansicht eines Teiles eines erfindungsgemäßigen Aktors mit erkennbarer Blocktrodenanordnung in Form von Biegegelenken, ausgebildet als offene, nach Stege verbundene Ellipsen.

[0054] Die in der Fig. 1 gezeigte Ausführungsform eines Vielschichtaktes nach dem Stand der Technik geht von einer interdigitierten Elektrodenanordnung aus. Mit dem Bezugszahlen 1 ist der Aktor selbst, mit dem Bezugszahlen 2 sind die piezokeramische Schichten benannt. Die inneren Elektroden 3 und 4 sind jeweils auf die gegenüberliegenden Flächen bis an die Oberfläche heraufgezogen. Die Grundmetallisierung 5 dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Ein unklarer Bereich 6 des Aktors 1 wird wieder bei Polarisieren noch beim Betrieb des Aktors 1 piezoelektrisch gedehnt und bildet ein Spannungsgespotential.

[0055] Der erfundengemäßige Aktor gemäß dem Ausführungsbeispiel nach den Fig. 2a und 2b umfasst piezokeramische Schichten 2 mit einer Dicke im Bereich von 20-100 µm. Diese Schichten sind durch runde Elektroden 3 und 4, vorzugsweise bestehend aus einer Ag/Pd-Legierung miteinander verbunden, die wechselseitig auf gegenüberlie-

genden Oberflächen herausgeführt sind.

[0056] Die herausgezogenen Elektroden 3, 4 werden über eine Grundmetallisierung 5, die auf den Seitenoberflächen aufgebracht wird, voneinander verbunden, so dass eine elektrische Parallelforschaltung der einzelnen piezokeramischen Schichten resultiert.

[0057] Im Bereich 6, der nicht bis zur Oberfläche herausgezogenen Elektroden 3, 4 entstehen aufgrund der iatomsgenauen elektrischen Feldverläufe in bekannter Weise bei der Polarisation oder beim Betrieb des Aktors mechanische Spannungskonzentrationen, insbesondere Zugspannungen, die letztendlich Ursache für eine unerwünschte, unkontrollierte Rissbildung sind.

[0058] Durch den gezielten Einbau von Gefügeschwächungen, die als Rissquelle 7 wirken, kann die Rissbildung gesteuert werden.

[0059] Bei einem Abstand der Rissquellen 7 im Bereich von 1-4 mm, bevorzugt 2-3 mm können die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut werden, dass in den Abständen zwischen den Rissquellen, auch bei Belastungen von weit über  $10^5$  Zyklen keine weitere Rissbildung beobachtet wird.

[0060] Fig. 2b zeigt den erfahrungsgemäßen Aktor nach der Polarisation. Hier ist die Entspannungswirkung schematisch dargestellt. Von der Rissquelle 7 geht dabei einerseits ein gezieltes Risswachstum 8 in das Innere des Aktors aus, welches durch eine gezielte energienpendende Gefügeausbildung über Vorgabe von Körnigkeiten und Porosität von selbst gestoppt oder unterbrochen wird.

[0061] Andererseits ergibt sich aber auch ein Risswachstum in die Grundmetallisierung an der Stelle 9 hinzu, welches im ungünstigsten Fall zur Durchtrümmung der Grundmetallisierungsschicht 5 führt.

[0062] Beim gezeigten Ausführungsbeispiel erfolgt die elektrische Verbindung der einzelnen Bereiche durch einen bogenförmig verlegten Draht 10, der punktuell über einen Lötpunkt 11 mit der Grundmetallisierung verbunden ist.

[0063] Das vorstehend erwähnte Rissquellen sind auf verschiedene Weise in den Aktor implementierbar. Grundsätzlich gilt es, an vorbestimmten Stellen ein Zusammensintern der aufeinandergepressten und verpressiven Gründelkorn ganz oder partiell zu verhindern, so dass an diesen Stellen die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge verringert ist. Vorstehend wird dadurch erreicht, dass in den vorgegebenen Bereichen beim Anbau der Schale einer Schicht eines organischen Binders durch Stehdruck aufgelegt wird, die mit einem Volumenanteil von 50% mit organischen Partikeln mit einem Durchmesser < 200 nm, die beim Sinterprozess vollständig austreiben, gefüllt ist.

[0064] Diese Schicht wird in den weiteren Verfahrens- oder Verarbeitungsschritten beim Verpressen auf eine Dicke < 1 µm zusammengepresst, und sorgt dafür, dass die in den Gründelkorn eingehäuschten Keramikteilchen sich nicht oder nur partiell bewegen, so dass beim Sintern der Mineralfahrstransport von Korn zu Korn ganz oder teilweise verhindert ist.

[0065] Eine alternative Möglichkeit besteht darin, dass amelle organischer Pfüllpartikel unorganische Partikel mit einem Durchmesser < 1 µm, die nicht mit dem piezokeramischen Werkstoff reagieren, wie z. B.  $ZrO_3$  oder Pulver eines gesinterten PZT-Werkstoffes mit einer im wesentlichen gleichen Zusammensetzung wie der Aktorwerkstoff dem Binder zugesetzt werden.

[0066] Auch können Rissquellen dadurch erzeugt werden, indem entweder im grünen oder im gesinterten Zustand Mikro-Keramik ausgeführt werden.

[0067] Der oben beschriebene Abbau der inneren mechanischen Spannungen durch eine gezielte Risseinbringung in den Aktor basiert gegenüber den bekannten Lösungen we-

sentliche Vorteile. So wird z. B. der belastbare Querschnitt des Aktors nur unwesentlich verringerkt, da die gezielt erzeugten Rissdächer bei Einwirkung einer Druckkraft in Richtung der Aktionsfläche aufeinandergepresst werden und somit zum irrgärenden Querschnitt beitragen.

[0068] Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich der Riss frühestens beim Polarisieren öffnet und somit beim Aufringen der Grundmetallisierung keine Metattpartikel in das Innere des Aktors gelangen können. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich verbesserte Qualität entsprechend gestalteter Aktores im Vergleich zum Stand der Technik.

[0069] Ein Vorteil besteht auch darin, dass für eine sichere und langzeitstabile elektrische Kontaktierung des Aktors eine einfache, dehnungsfreieste Aussenelektrode realisierbar ist, die nur punktuell mit der Grundmetallisierung zwischen den Spannungswirksäumen zu verbinden ist.

[0070] Eine Ausgestaltung einer dehnungsfesten resistenten bzw. elastischen Aussenelektrode 12 in Schlitz- oder Mäanderform zeigt Fig. 3c. Dort sind auch passive Rissdächer 13 zu sehen. 14 ohne innere Elektroden gezeigt, die eine Kreiskoppelförmige bilden. Diese Rissdächer 14 können z. B. aus einem monolithischen Isolationsmaterial bestehen und dienen der Aufnahme von verschiedenen Koppellementen.

[0071] Eine ebenso mit passiven Rissdächern 14 versehene Ausführungsform des Aktors zeigt Fig. 3b.

[0072] Dort ist eine festkörpergelegene, umfassende Aussenelektrode in Form von offenen Ellipsen 13 vorhanden. Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse verläuft im wesentlichen im Bereich erwarteter Risse. Die einzelnen Ellipsen 14 mit einer Steife 15 auf, die der elektrischen Kontaktierung der Ellipse 13 untereinander dienen. Im Bereich der Steife 15 ist jeweils ein Lötspunkt 11 ausgebildet.

[0073] Gemäß der Ausführungsform nach Fig. 3 ist der Abstand vom ersten Entspannungsriss 7 zur passiven Rissdächer 14 gleich dem Abstand der Entspannungsrisse untereinander gewählt. Bei der zweiten Ausführungsform nach Fig. 3b beträgt der Abstand des ersten Entspannungsrisses 7 zur passiven Rissdächer 14 gleich dem halben Abstand der übrigen Spannungsrisse untereinander.

[0074] Die Fig. 4a offenbart einen in bestimmten Abschnitten des Aktors vorhandenen größeren Abstand der inneren Elektroden 3 und 4. Dieser doppelte Abstand im Vergleich zu benachbarter Innenelektroden reduziert die Gefahr, dass ein dazwischen befindlicher Riss 7 zu den Innenelektroden wandert und deren Kontaktierung hin zur Grundmetallisierung bzw. entsprechende elektrische Verbindung unterbricht.

[0075] Die in den Fig. 3a und 3b schematisch gezeigte flächige Gestaltung der, z. B. aus Kupfer-Berylliummaterial bestehenden Aussenelektrode ist nur beispielhaft zu verstehen. Grundsätzlich ist jede flächige Aussenelektrodenform geeignet, die in lateraler Richtung zerstörungsfrei Dehnung- bzw. Spannungskräfte aufnehmen kann.

- 1 Aktor
- 2 piezokeramische Schicht
- 3, 4 innere Elektrode
- 5 Grundmetallisierung
- 6 inaktiver Bereich des Aktors
- 7 Mikrogefügefiederung
- 8 durch Polarisierung ausgelöster gezielter Mikroriss
- 9 Unterbrechung der Grundmetallisierung
- 10 bogenförmig verlegter Draht
- 11 Lötspunkt
- 12 mäanderförmige Aussenelektrode
- 13 Ellipse einer entsprechend ausgebildeten Aussenelektrode

trode

14. Bischichtaktor der Aktors, beverzugt als monolithische Isolationschicht ausgeführt

15. Verbindungssteg der Ellipseform - Aussenkontaktkonstruktion

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostatischen Material, wobei der Aktor als Stapelanordnung in quasi mechanischer Reihenschaltung einer Vielzahl von Piezoplatten durch Sintern von Grünfolien ausgebildet wird, vorhandene Innenelektronen im Plattenstapel zu gegenüberliegenden Außenflächen des Stapels geführt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Aussenkontaktkonstruktion jeweiliger Elektrodengruppen parallel verschalten sind, dadurch gekennzeichnet, dass entlang der Stapellängssachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, von denen bestanden, im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Außenstellen, zu denen die Innenelektronen herausgeführt sind, gezielt Mikroströmungen um Aktorgerüste eingebaut werden, welche frühestens beim Polarisieren des Aktors einem vorgegebenen, begrenzten, spannungsgabenden Wachstum in das Innere des Aktors unterliegen und weiterhin die Grundmetallisierung und/oder die Aussenkontaktkonstruktion mindestens im Bereich der Mikroströmungen im Aktorgerüst destruktiv resistent, oder elastisch ausgebildet ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikroströmungen öffentlich begrenzt ein Zusammensintern der Grünfolien verhindern.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich der Mikroströmungen beim Stapelaufbau eine Schicht oder Menge eines organischen Binders aufgebracht wird, welche einen Volumenanfall von bis zu 50% organischer Partikel mit einem Durchmesser  $\leq 200 \text{ nm}$  enthält, die beim Sinterprozess nahezu vollständig austreten.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht direkt Siebdruck aufgebracht wird, wobei diese Schicht von dem Sintern durch Pressen daran verdichtet wird, dass die in den Grünfolien eingebrachte Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammensintern ganz oder teilweise zu unterbinden.
5. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikrostrukturen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von  $\leq 1 \mu\text{m}$ , welche nicht mit dem piezoelektrischen Werkstoff des Stapels reagieren, ausgebildet sind, wobei die Füllpartikel dem Binder zugesetzt werden.
6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Mikroströmungen durch Kerbunrisse indiziert sind, welche entweder im grünen oder gesinterten Zustand erzeugt werden, jedoch ohne die tragende Querschnittsfläche des Aktorstapels zu reduzieren.
7. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenkontaktkonstruktion in Kenntnis der Lage der eingebrachten oder vorgesehenen Mikroströmungen erstellt wird, wobei die Aussenkontaktkonstruktion jeweils eine flächige Biegeelektrode umfasst, welche mit der Grundmetallisierung mindestens im Bereich zwischen den Mikroströmungen punktuell oder abwechselnd elektrisch in Verbindung steht.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeich-

net, dass die Biegeelektrode am einem aufgelösten Kupfer/Beryllium-Streifen besteht und der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufwesende Abschnitte umfasst, wobei die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse jeweils im Bereich einer der Mikroströmungen verläuft.

9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Biegeelektrode als Mänder- oder Doppelmänderelektrode ausgeführt ist, wobei die Verbindungsabschnitte des Mändlers jeweils im Bereich der Mikroströmungen verlaufen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass auf den Biegeelektroden Löthäsnitte oder Lötspitze zur weiteren Verdrillung vorgesehen sind.

11. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf die Stapelanordnung elektrodenfreie passive Endschichten als Kraftkopfflächen aufgebracht werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand der ersten Mikroströmung zur passiven Endschicht gleich dem ganzen oder halben Abstand der übrigen über die Längssachse verteilten Mikroströmungen gewählt wird.

13. Monolithischer Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostatischen Material, wobei der Aktor eine Stapelanordnung von Piezoplatten ist, welche über innere Elektroden, eine gemeinsame Grundmetallisierung sowie Aussenkontaktkonstruktion verfügt, dadurch gekennzeichnet, dass entlang der Stapellängssachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, delaminierende Mikrogerügsfestungen vorhanden sind, welche die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitigem Erhalt der Druckfestigkeit des Stapels verringern.

14. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine destruktionsresistente, flächige Aussenelektrode, welche nur punktuell mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den delaminierenden Mikrogerügsfestungen verbunden ist.

15. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode ein flächig strukturierter Kupfer/Beryllium-Streifen ist.

16. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode die Form eines Mändlers oder Doppelmändlers mit Biegegelenkfunktion aufweist, wobei zwischen den Lippen im wesentlichen in Richtung der Nebenachsen ein Verbindungs- und Kontaktierungssteg vorhanden ist.

17. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Aussenelektrode die Form eineradergerührter, offener Ellipse mit Biegegelenkfunktion aufweist, wobei zwischen den Lippen im wesentlichen in Richtung der Nebenachsen ein Verbindungs- und Kontaktierungssteg vorhanden ist.

18. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse der Aussenelektrode im wesentlichen im Bereich der Mikrogerügsfestungen verläuft.

19. Monolithischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 13 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass elektrodenfreie passive Endschichten am oberen und/oder unteren Ende des Aktors ausgebildet sind.

20. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die passiven Endschichten eine monolithische Isolationschicht und/

DE 102 34 787 C 1

12

11

soll, welche Koppellemente trage oder aufnimmt,

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

5

19

63

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

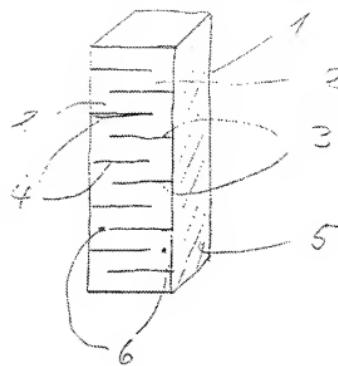


Fig. 1

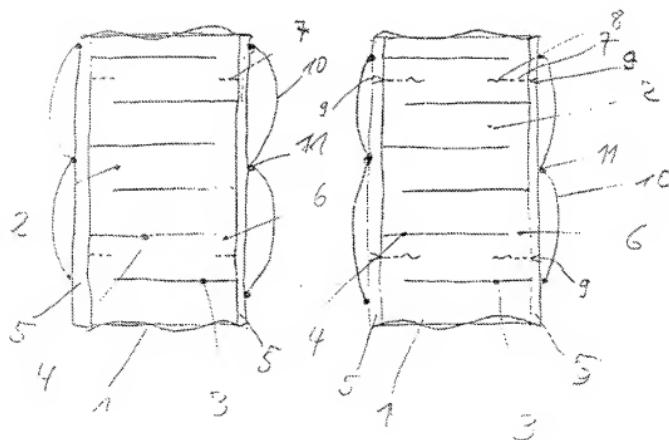
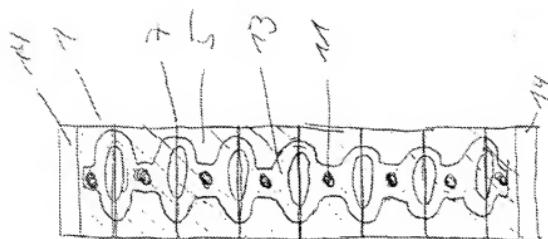


Fig. 2 A

B



B

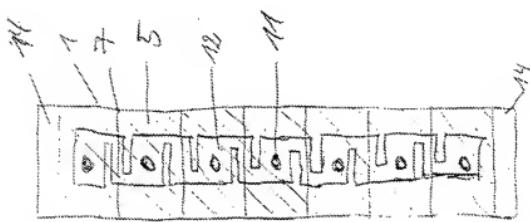
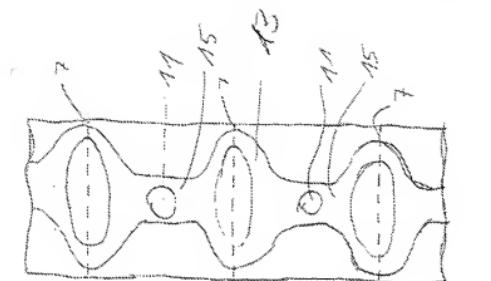
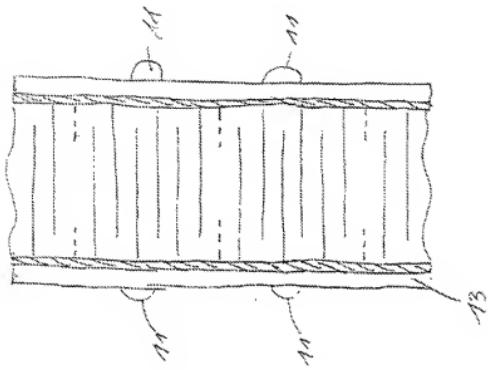


Fig. 3 A



B



A

Fig. 4